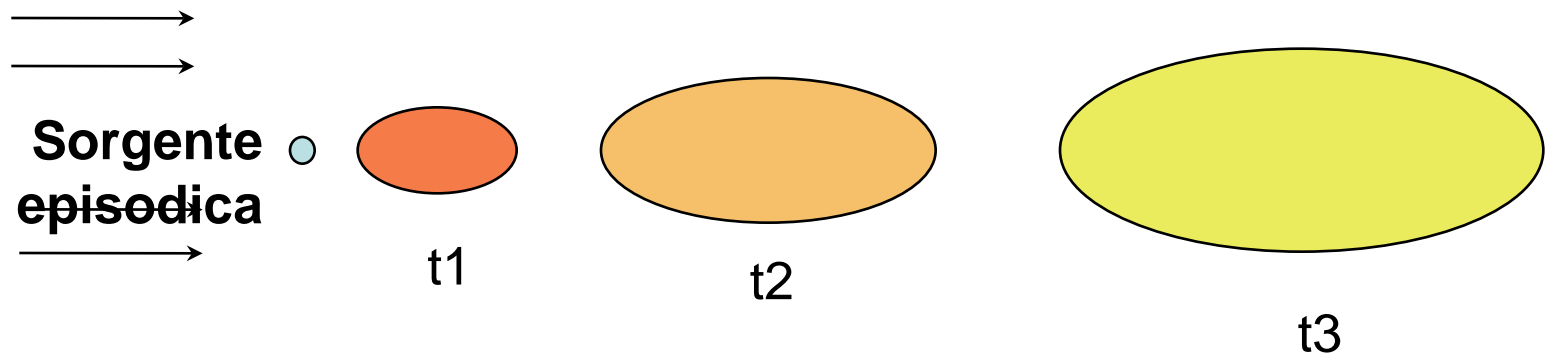
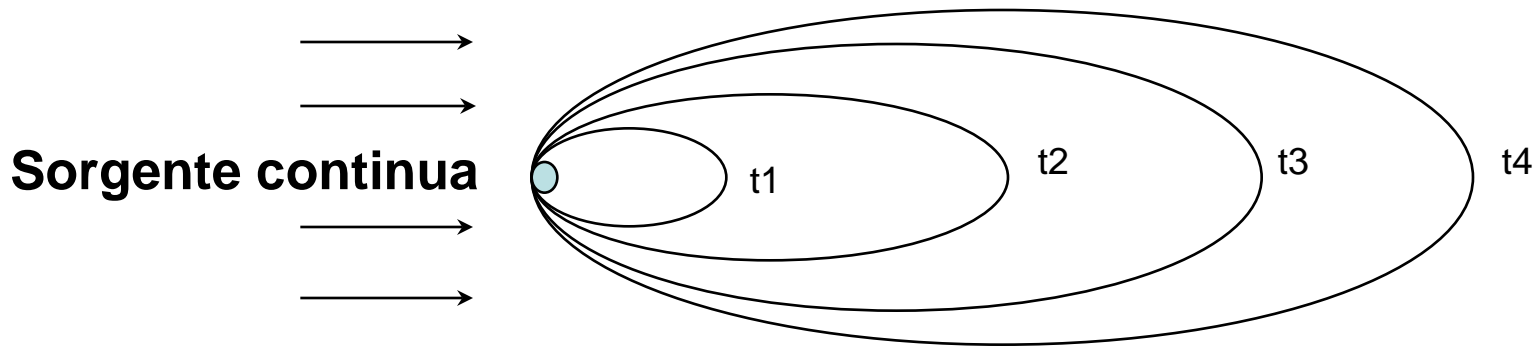
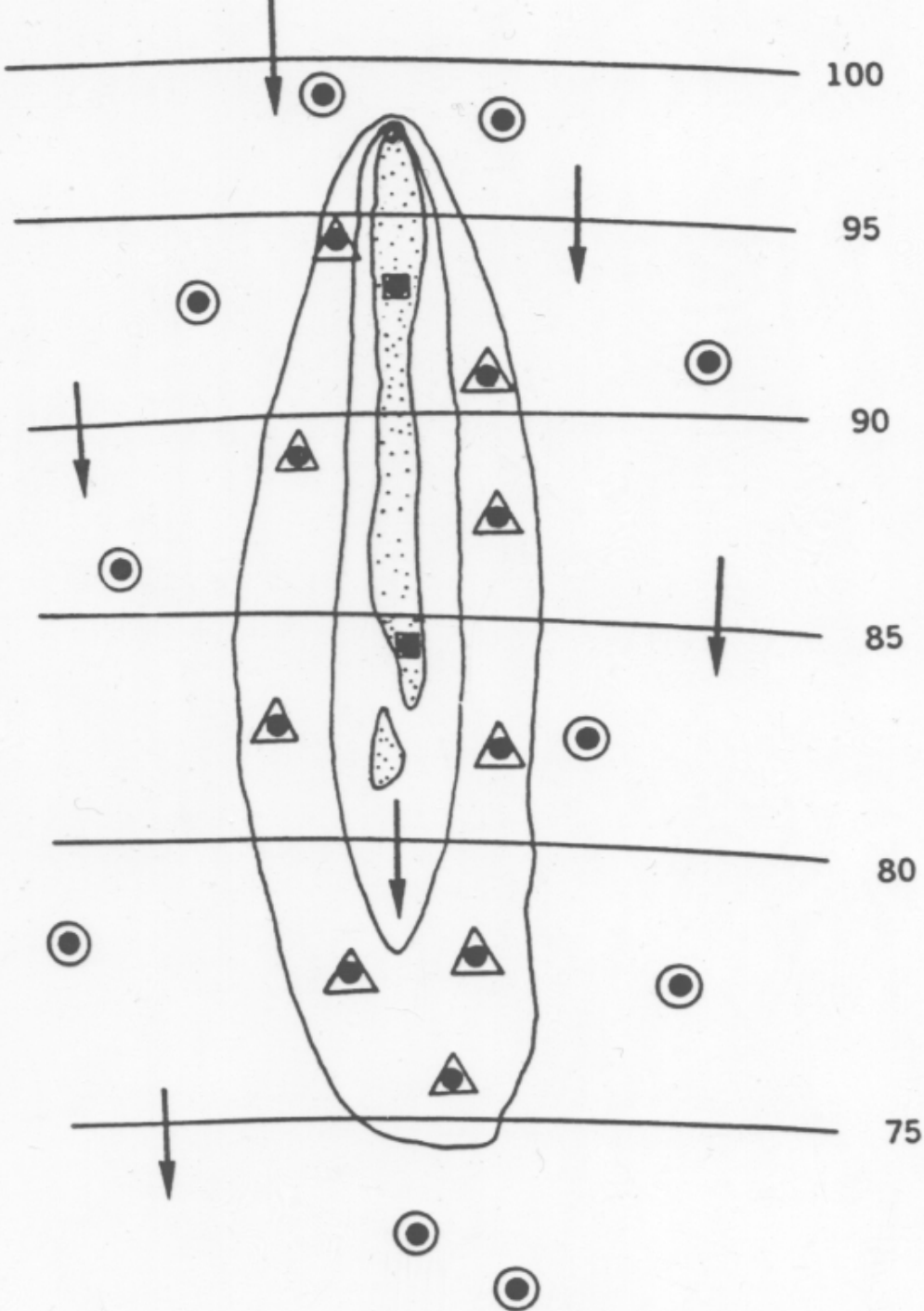


# LEZIONE X

## IL TRASPORTO



# PLUME



- Pozzi non inquinati
- △● " med. inquinati
- " inquinati
- punto d'immissione
- ⬮ area più inquinata

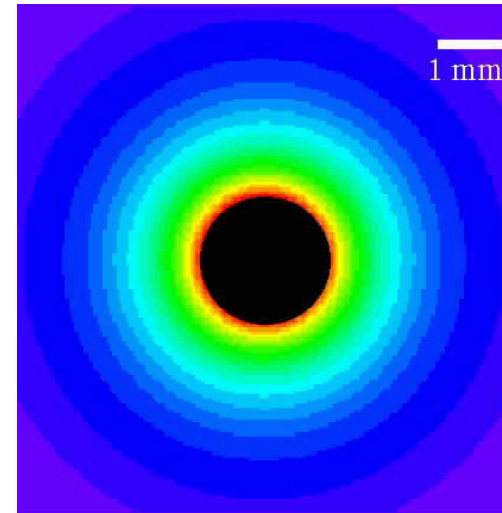
m s.l.m.

# Trasporto dei contaminanti

Complesso insieme di processi

## Diffusione

Migrazione da zone più concentrate verso zone meno



## Avvezione

Il soluto si muove con la falda

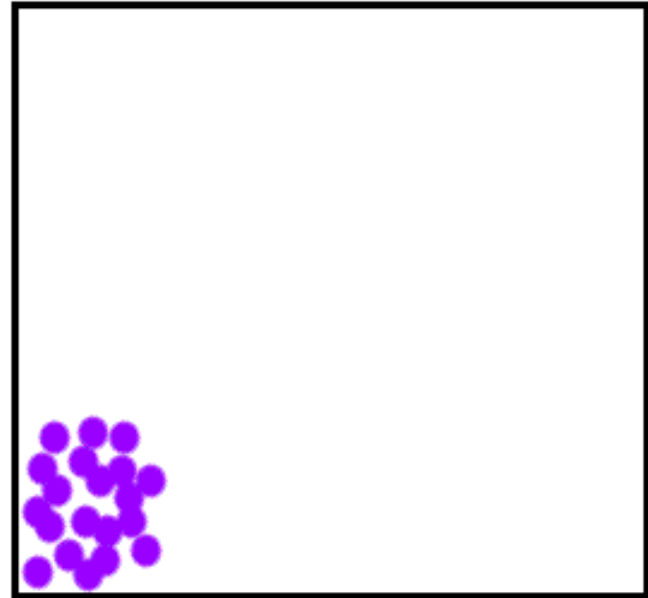
## Dispersione

Il soluto si sparpaglia; azione diluitiva

**Un soluto nell'acqua migra  
secondo gradiente di  
concentrazione**

## **Diffusione**

**Legge di Fick**



$$F = - D_d \, dC/dx$$

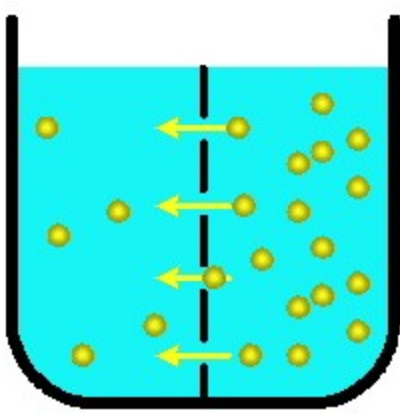
**F = flusso di massa**

**$D_d$  = coefficiente di diffusione**

**C = concentrazione**

**$dC/dx$  = gradiente di concentrazione**

**Segno negativo – migrazione da alta a bassa concentrazione**

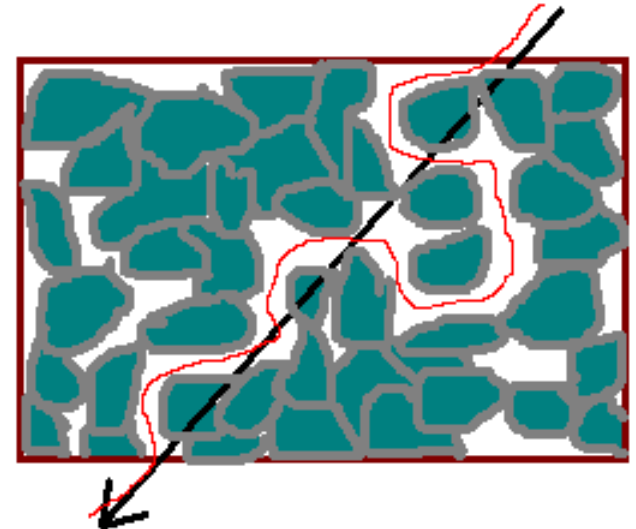


In un mezzo poroso la diffusione  
non è così efficace come nell'acqua libera

## Tortuosità

Lunghezza reale del percorso ( $L_e$ )  
sulla distanza rettilinea ( $L$ )

Il Soluto si muove solo nei pori



$D^*$  = coefficiente di diffusione efficace

$$D^* = \omega D_d$$

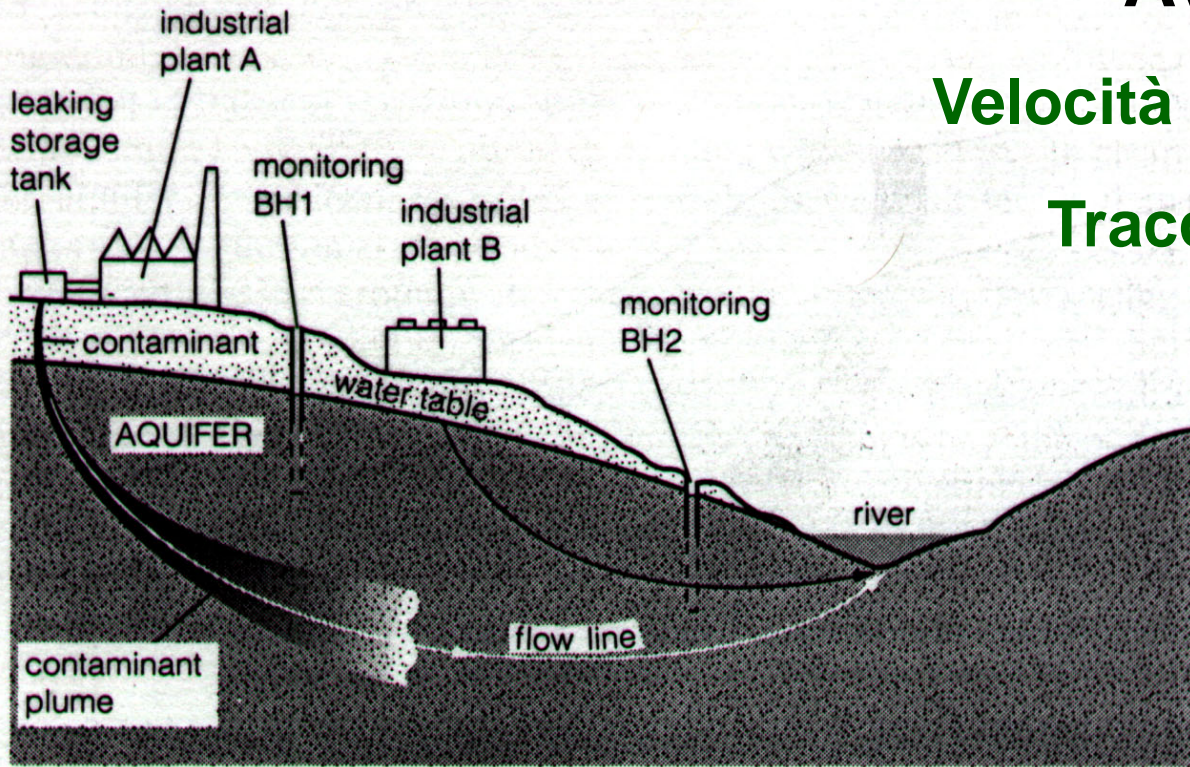
$\omega$  = coefficiente empirico funzione Tortuosità  
sempre  $< 1$

Per specie conservative,  $\omega = 0.01 - 0.5$

# Avvezione

Velocità semplice di trasporto

Tracciamento di particelle



Contaminante a stessa velocità dell'acqua

Fase disciolta in falda

$$v_x = - \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl}$$

$v_x$  = velocità lineare

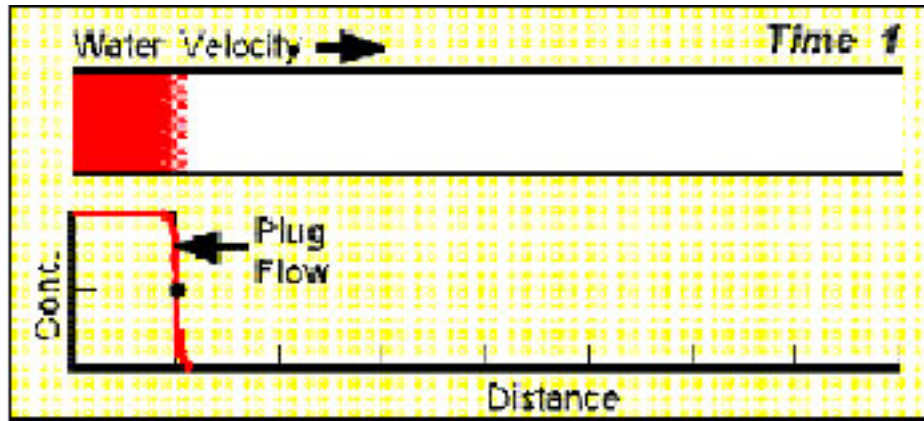
$K$  = conducibilità idraulica

$n_e$  = porosità efficace

$dh / dl$  = gradiente idraulico

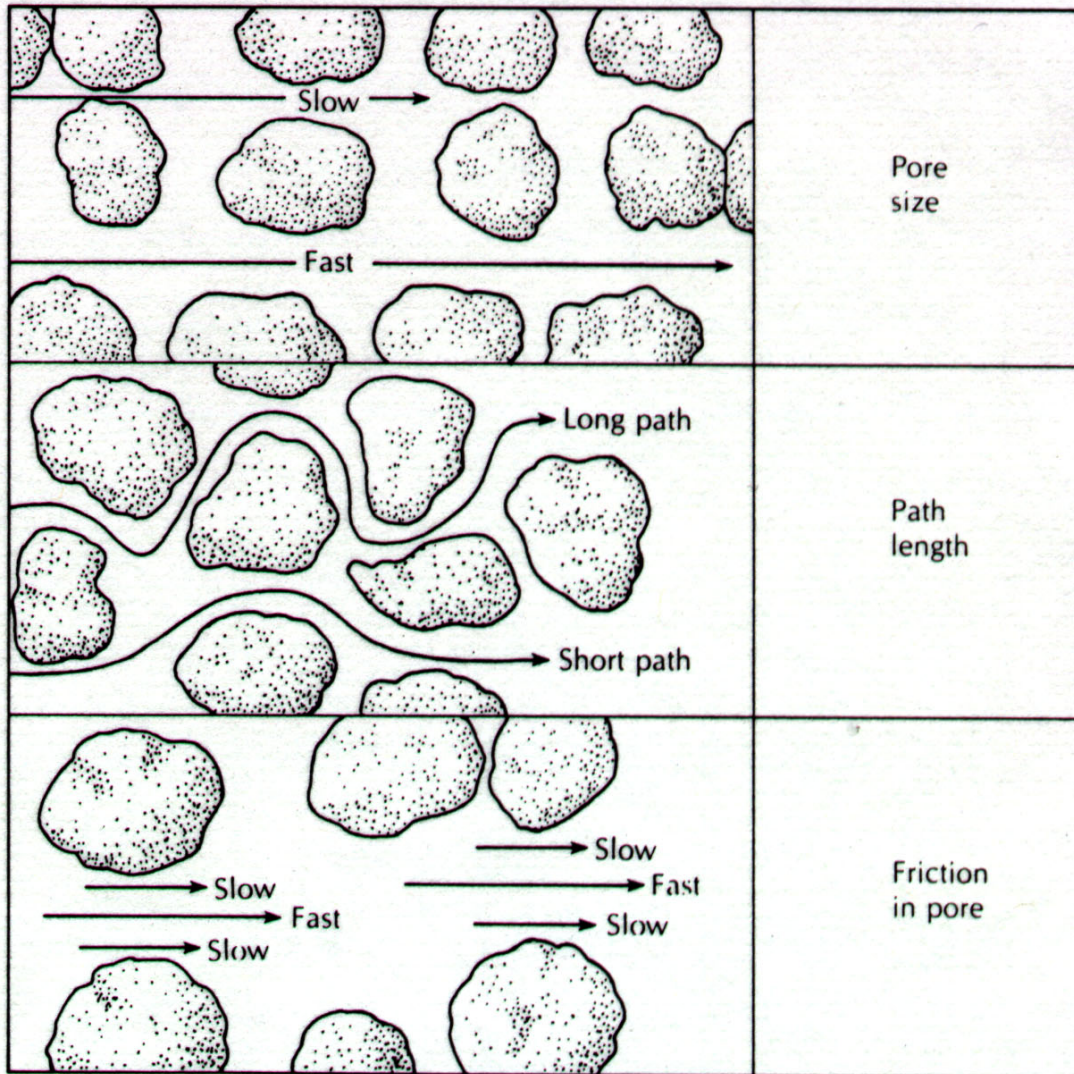


# Trasporto avvettivo



**Flusso a pistone**

# Dispersione



**Taglia del  
poro**

**Tortuosità**

**Attrito**

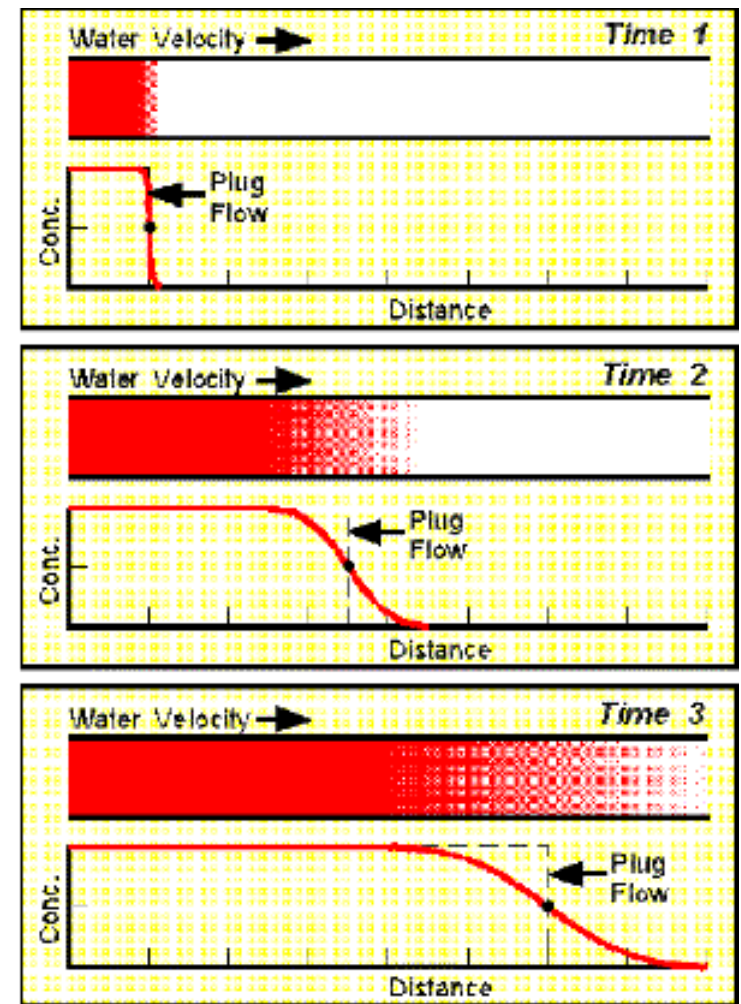
**Più veloce al centro**



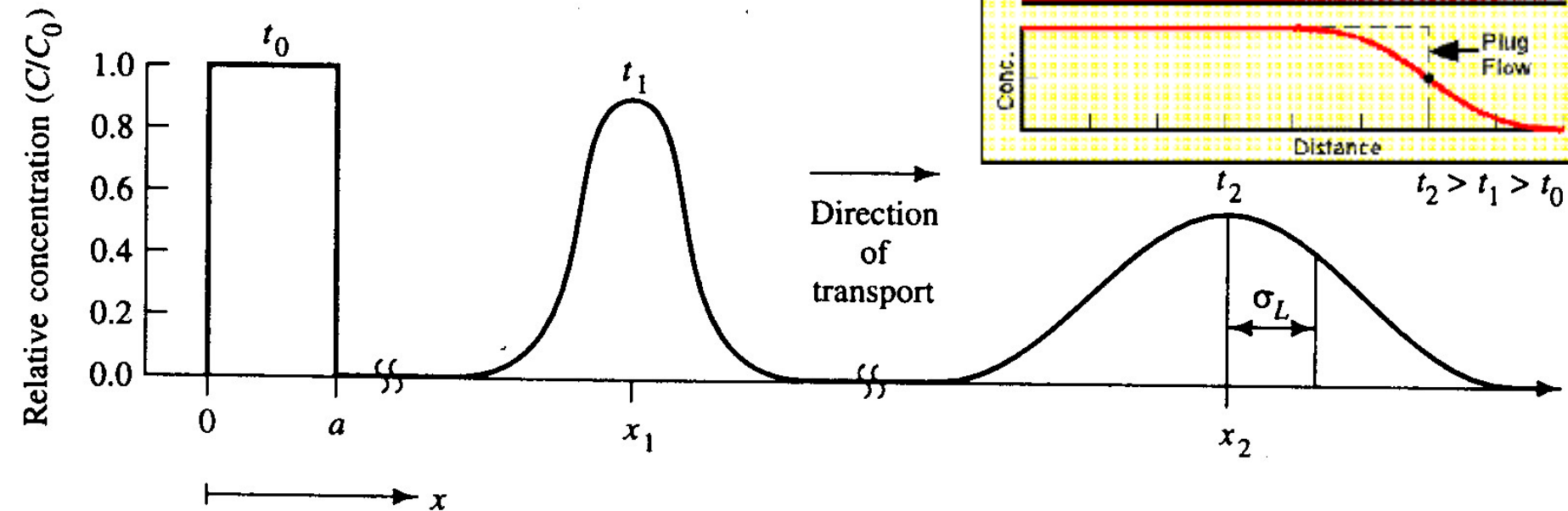
# Migrazione del plume

Il centro di massa si muove a  
stessa velocità media della falda

Distribuzione  
Gaussiana

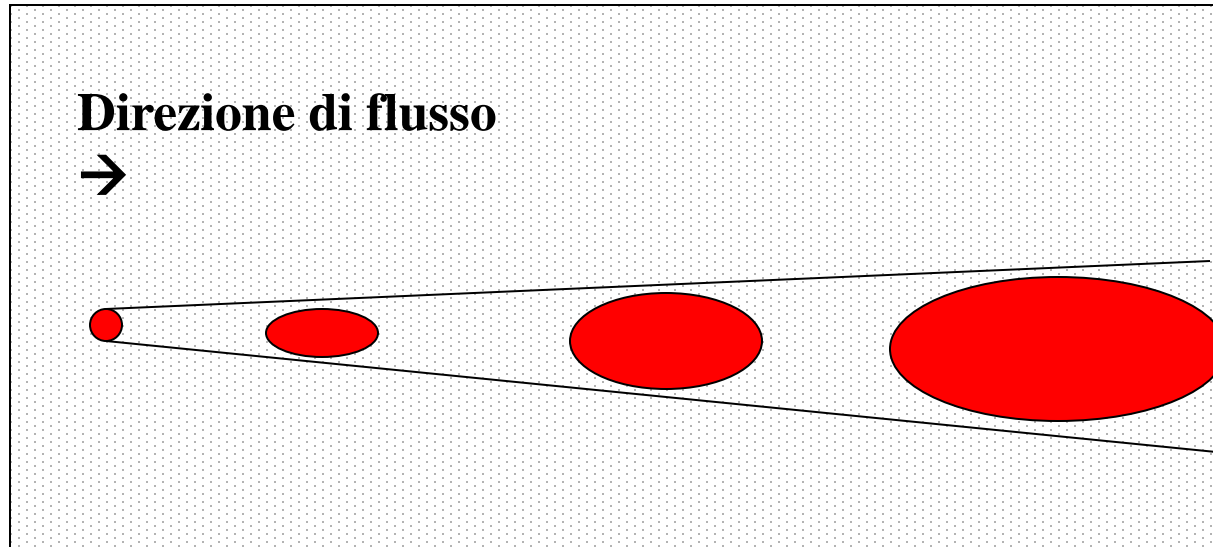


$$t_2 > t_1 > t_0$$



# Dispersione

**Dispersione meccanica – causata dal moto del fluido**



**Dispersione longitudinale – lungo la linea di flusso**



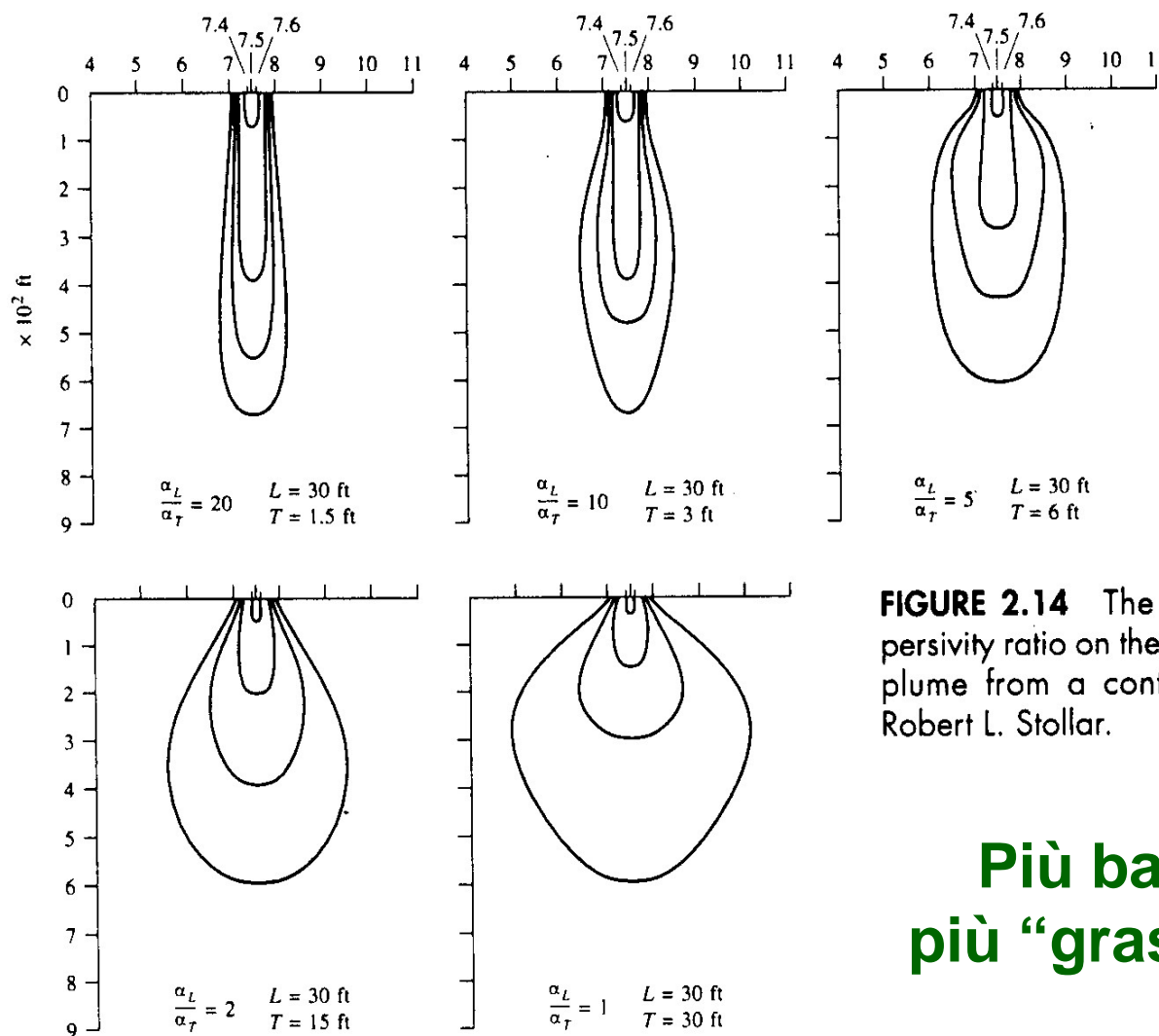
**Dispersione trasversale – perpendicolare al flusso**



$$D_L = \alpha_L v_x + D^*$$

$$D_T = \alpha_T v_x + D^*$$

## Rapporto di $\alpha_L$ su $\alpha_T$

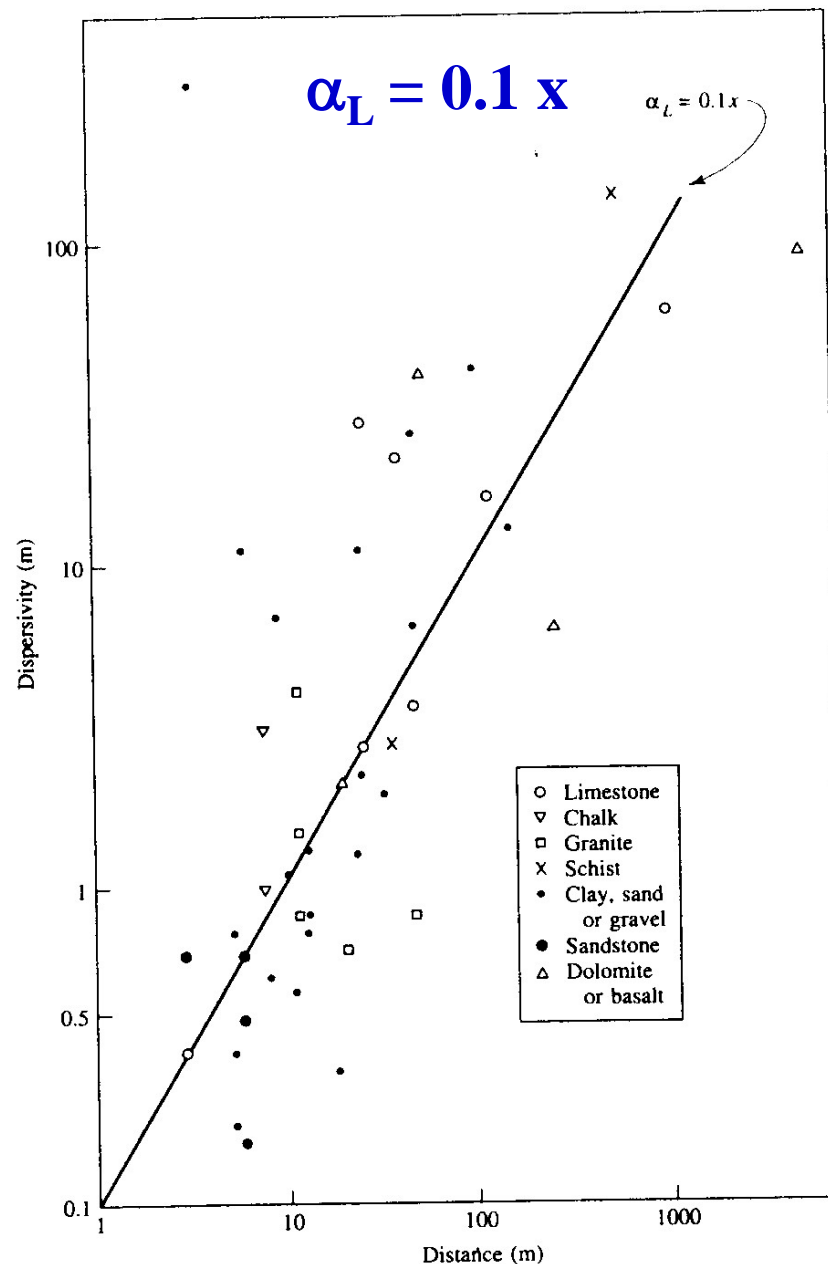


Più basso il rapporto,  
più “grasso” il pennacchio

# Effetto scala sulla dispersività

La dispersività  
aumenta in relazione alla  
distanza  
su cui è misurata

Macrodispersione  
(scala di campo)



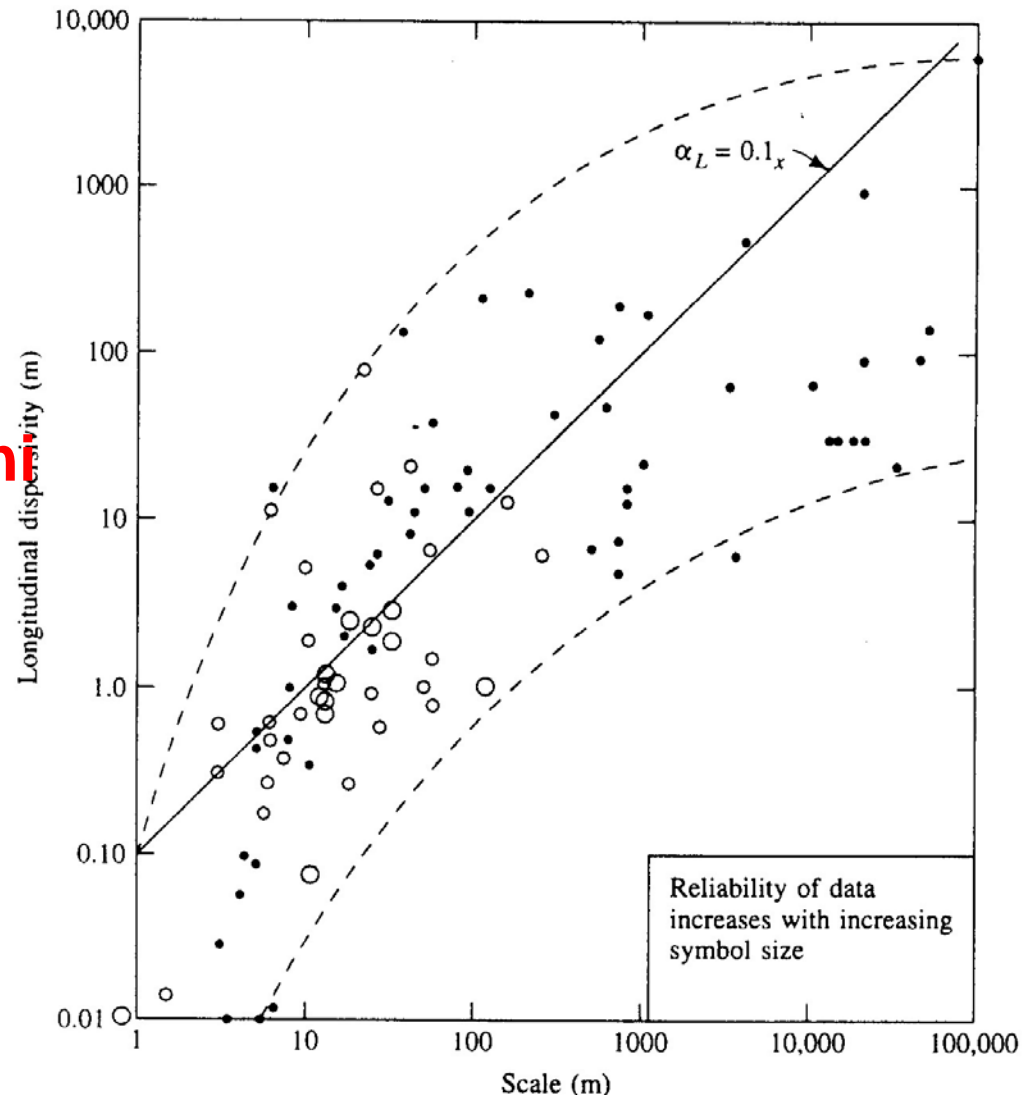
# Come si spiega l'effetto scala?

A piccola scala (lab)  
Dispersione è dovuta  
a diffusione,  
taglia dei pori e  
geometria pori

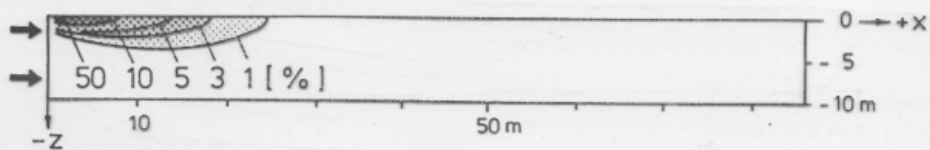
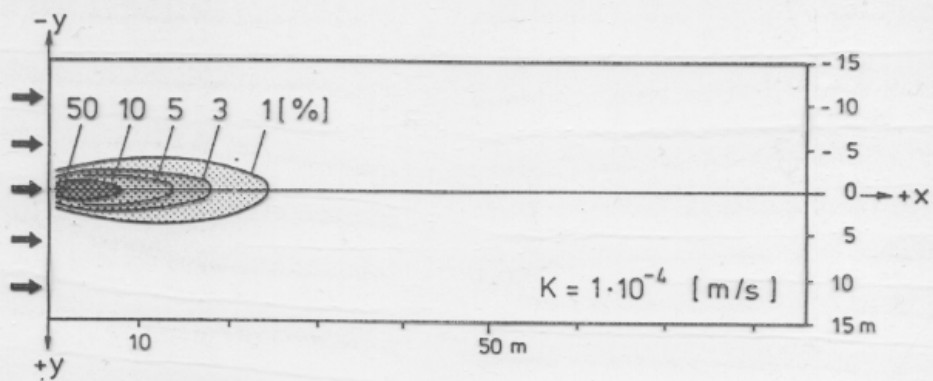
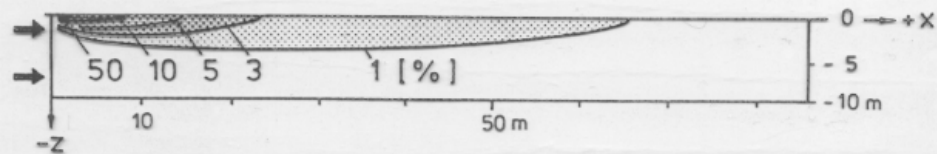
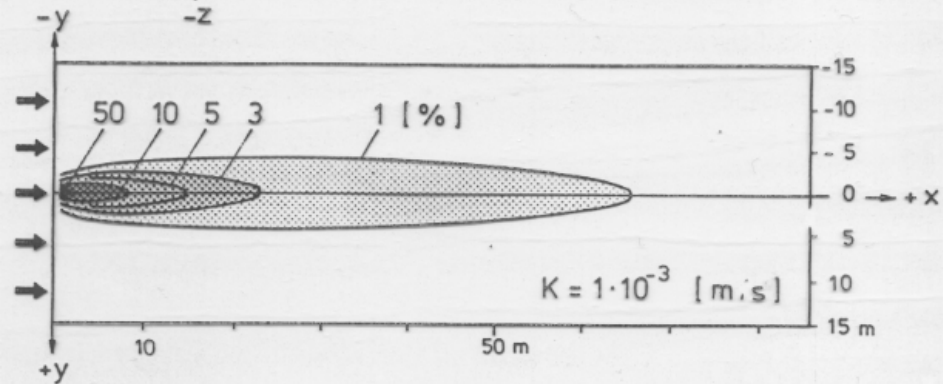
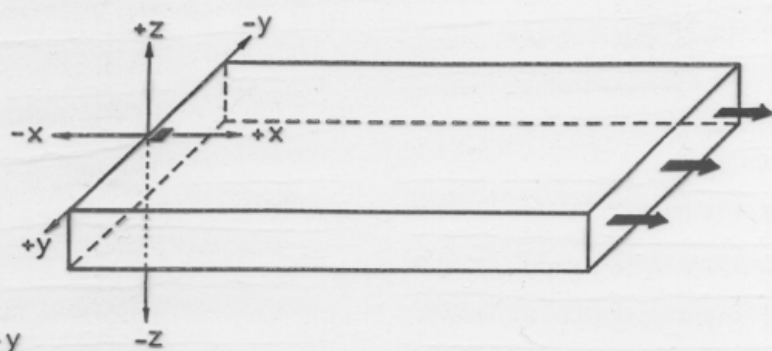
Tortuosità e micro variazioni  
nella velocità intraporo  
e fra pori

Alla scala di campo  
la dispersione è dovuta  
alle variazioni nella  
stratigrafia e nella  
permeabilità

Eterogeneità di  $K$  e  $n_e$







*PLUME*

# Plume a scala di laboratorio

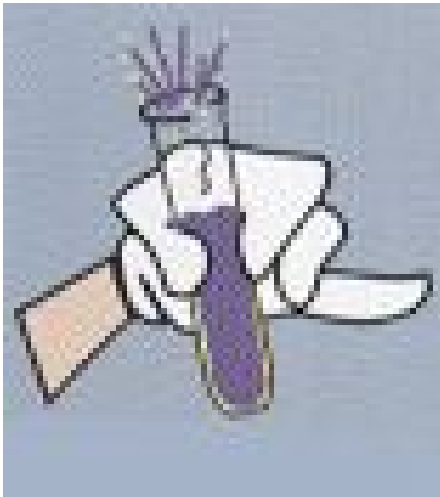


# Trasporto di soluto

**Conservativo e Reattivo**

**Conservativo**

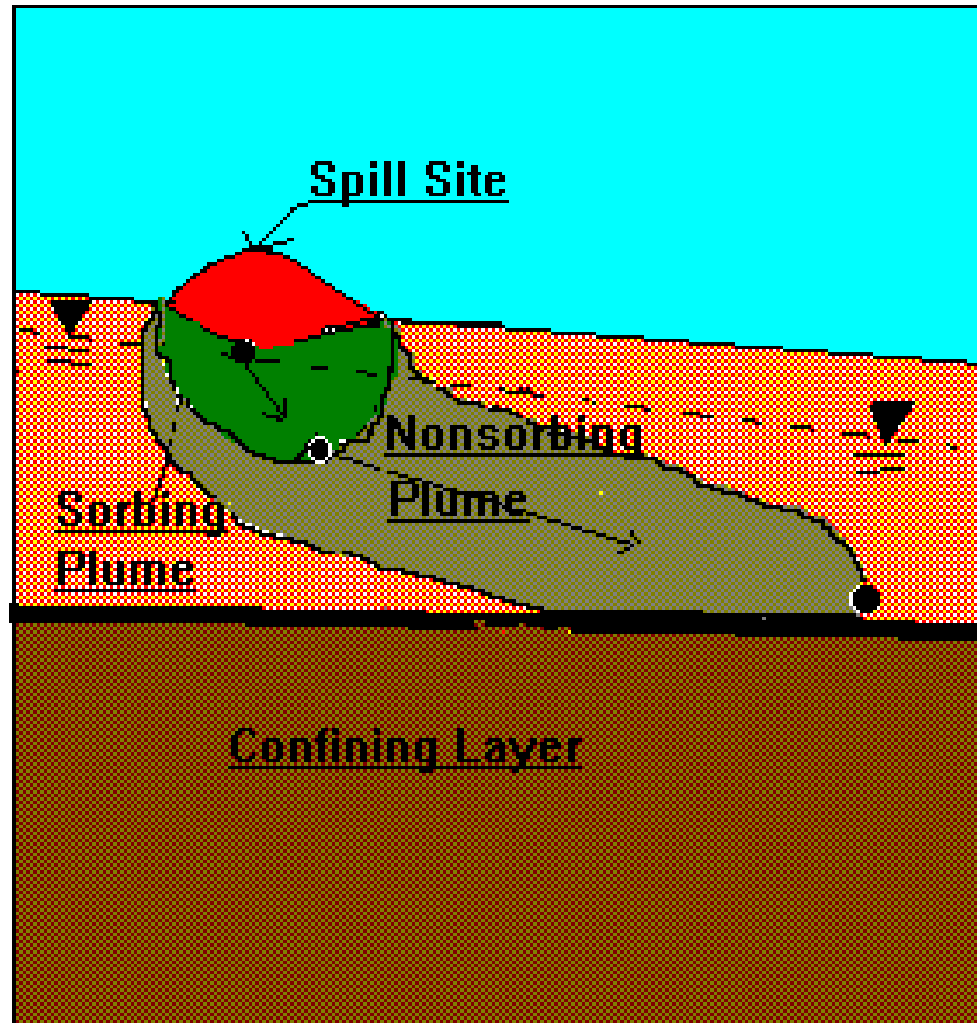
**Non reagisce con solido/acqua**



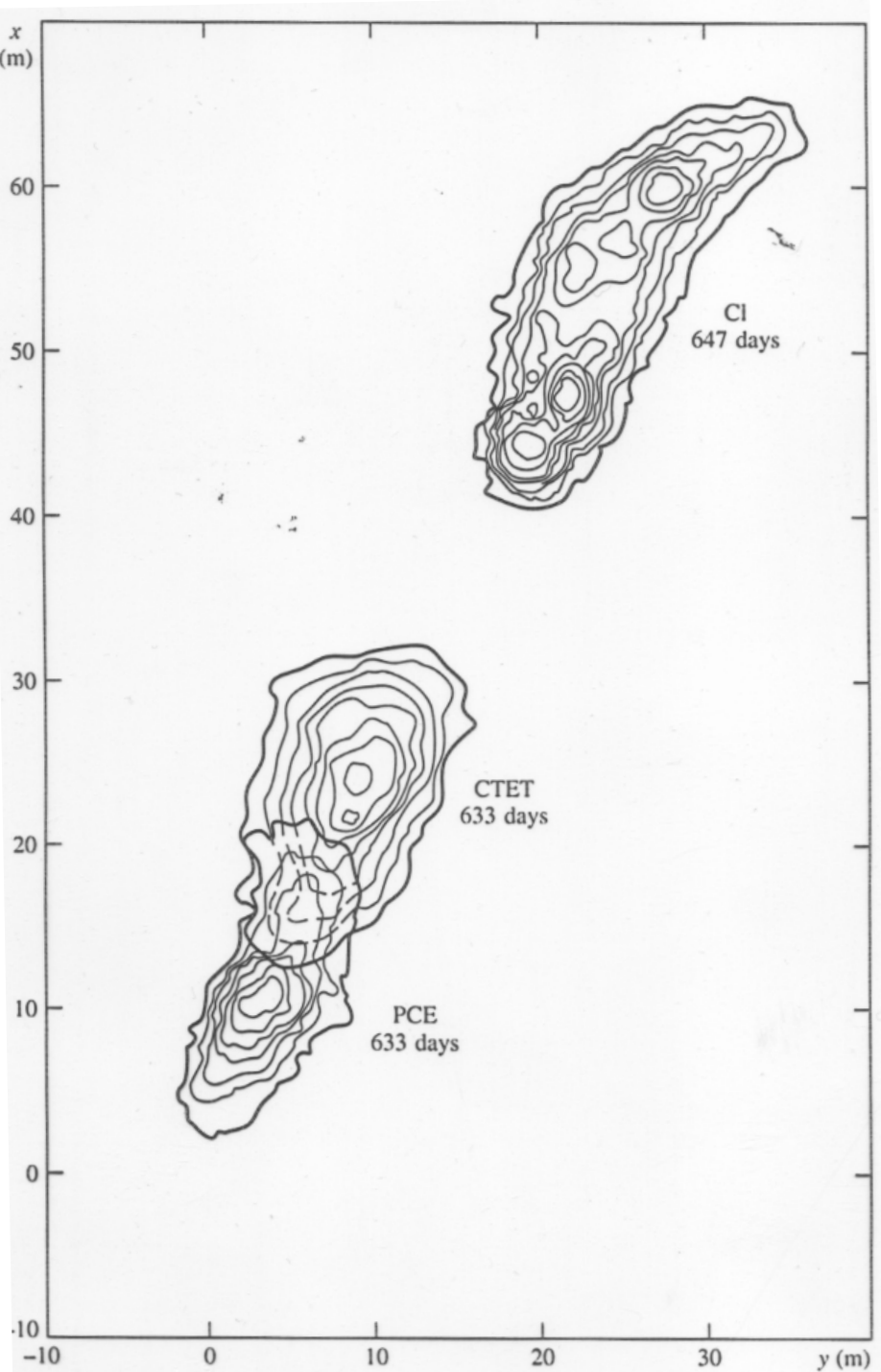
**Reattivo**

**Adsorbito su particelle minerali e  
sostanza organica**

Se il soluto è reattivo, migrerà più lentamente della velocità media della falda per l'adsorbimento



$$v_c = v_x / [1 + (\gamma_d / n) (K_d)] = v_x / r_f$$



*RITARDO*



# Decadimento radioattivo ma non solo

Emivita  $\lambda$

Periodo di tempo in cui la massa del  
contaminante si dimezza

Some Half-lives for Radioactive Decay

Isotope		Half-life	Decay Mode
Polonium	$^{214}_{84}\text{Po}$	$1.64 \times 10^{-4} \text{ s}$	$\alpha, \gamma$
Krypton	$^{89}_{36}\text{Kr}$	3.16 min	$\beta^{-}, \gamma$
Radon	$^{222}_{86}\text{Rn}$	3.83 da	$\alpha, \gamma$
Strontium	$^{90}_{38}\text{Sr}$	28.5 yr	$\beta^{-}$
Radium	$^{226}_{88}\text{Ra}$	$1.6 \times 10^3 \text{ yr}$	$\alpha, \gamma$
Carbon	$^{14}_6\text{C}$	$5.73 \times 10^3 \text{ yr}$	$\beta^{-}$
Uranium	$^{238}_{92}\text{U}$	$4.47 \times 10^9 \text{ yr}$	$\alpha, \gamma$
Indium	$^{115}_{49}\text{In}$	$4.41 \times 10^{14} \text{ yr}$	$\beta^{-}$

$$C = C_0 e^{-(\ln 2/\lambda)t}$$

$C_0$  = conc.iniziale e  $t$  = tempo

# Equazione 1D di avvezione-dispersione

con ritardo e reazione

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\gamma_d}{n} \frac{\partial C^*}{\partial t} + \left( \frac{\partial C}{\partial t} \right)_{rxn}$$

dispersione      avvezione      ritardo      reazione

$D_L$  = coefficiente di dispersione longitudinale idrodinamica

$C$  = concentrazione del soluto in acqua

$v_x$  = velocità media effettiva dell'acqua

$t$  = tempo

$\gamma_d$  = densità secca acquifero

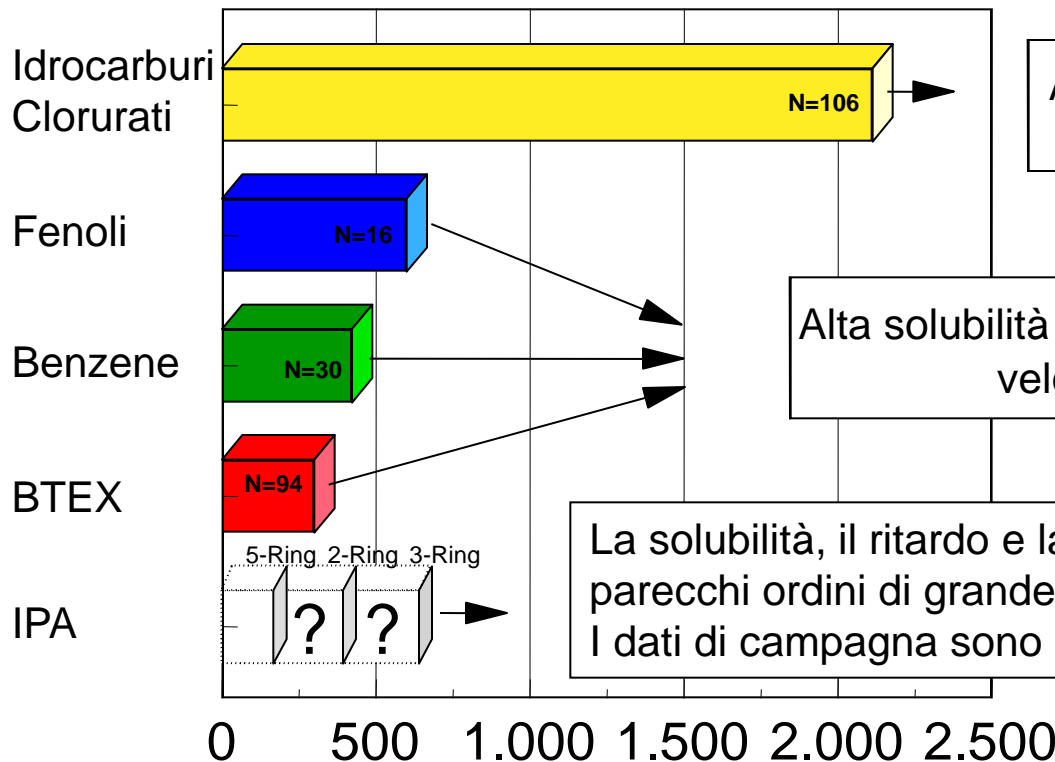
$n$  = porosità totale

$C^*$  = quantità di soluto adsorbito per peso secco di solido

$rxn$  = reazioni chimiche o biologiche

# Lunghezza del plume

## Contaminanti



## Proprietà dei Contaminanti

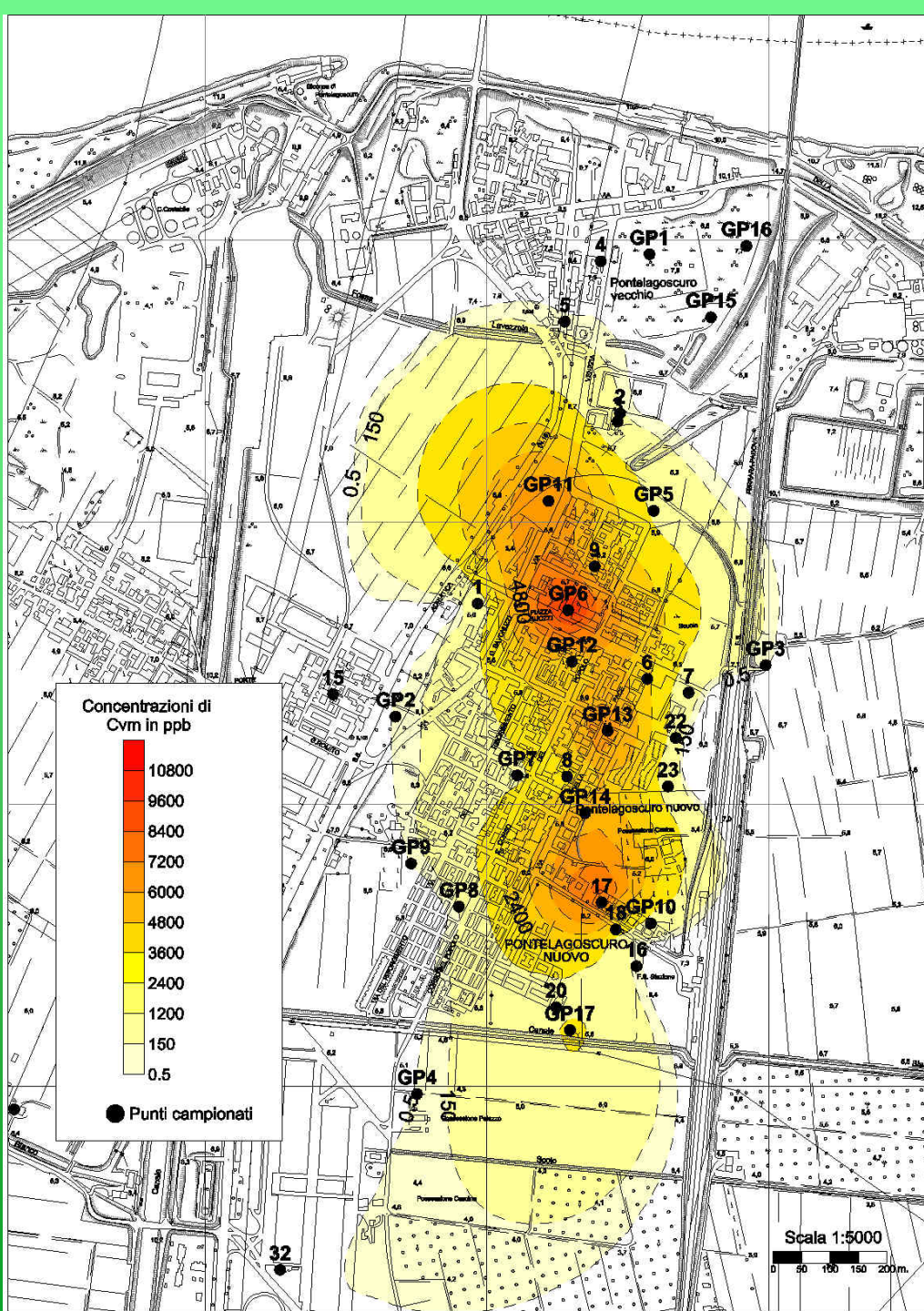
Alta solubilità in acqua, basso ritardo, lenta degradazione

Alta solubilità in acqua, basso ritardo, veloce degradazione

La solubilità, il ritardo e la degradazione differiscono di parecchi ordini di grandezza rispetto agli altri descritti sopra  
I dati di campagna sono molto incerti

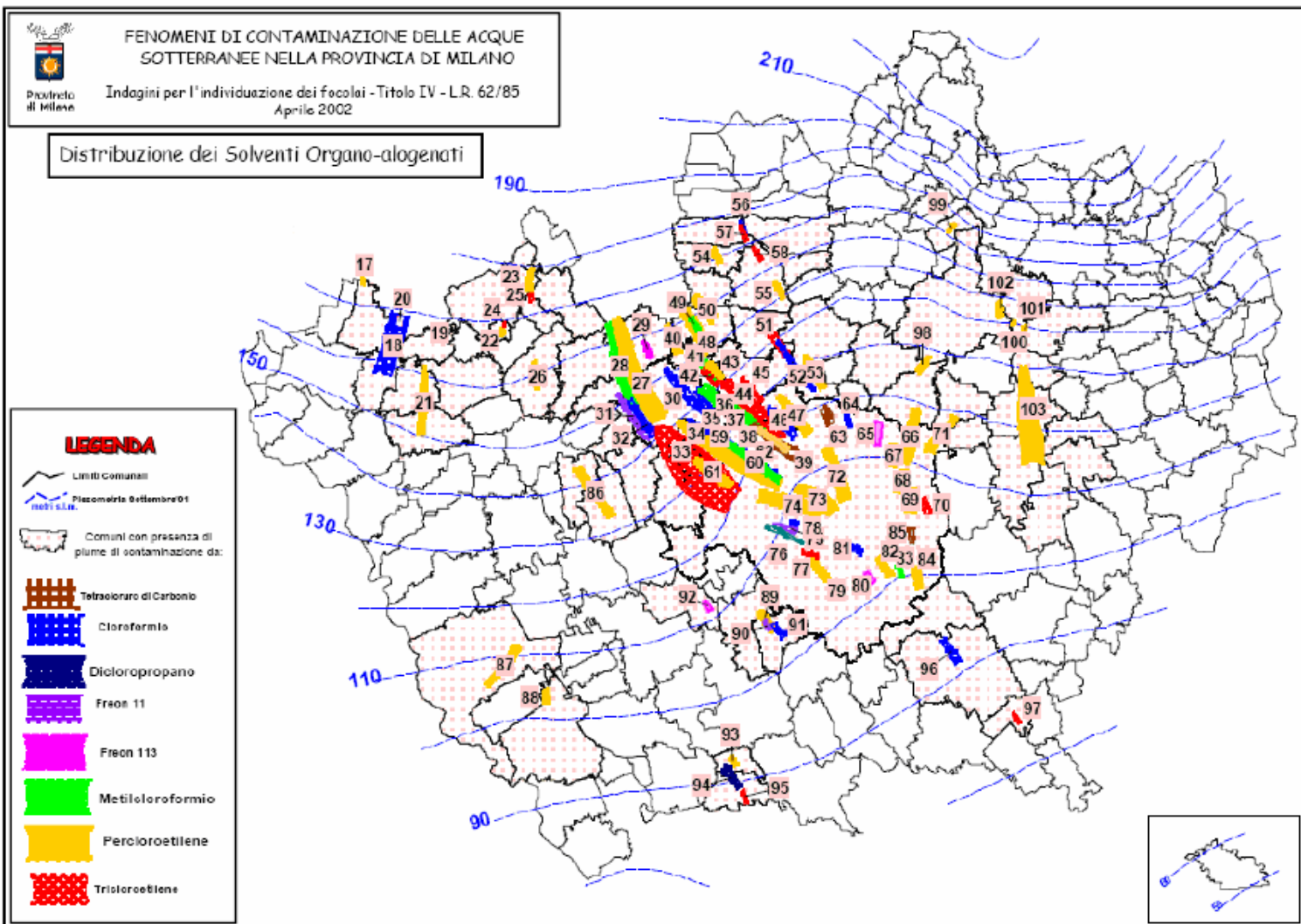
Lunghezza massima del plume (m) nel 75% dei casi considerati

Localizzazione in  
pianta del *Plume* di  
contaminazione da  
Cloruro di Vinile  
mediante  
interpolazione dei  
valori massimi dei  
dati analitici  
provenienti dal  
campionamento  
sondaggi e dai  
pozzi.





# FENOMENI DI CONTAMINAZIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE CHE GRAVANO SU CENTRO URBANO: MILANO





*Per approfondire.....*



*Pranzini, pag. 239-246*